

12 - 13 注水誘発地震の統計的な特徴 Statistical feature of injection-induced earthquakes

(独) 産業技術総合研究所
Geological Survey of Japan, AIST

1. はじめに

流体の地下深部注入はいくつかの分野で科学的に若しくは産業アプリケーションとして利用されている。大半の現場では、場合により高い圧入圧にもかかわらず顕著な誘発地震活動が観測されなかったが、注水と関連した誘発地震活動も多く報告されている。マグニチュード5を超えた災害性誘発地震の例も幾つかあった。間隙圧(の増加分)が地下深部へ拡散し、岩盤や断層の破壊強度(応力の限界値)が下がり、その結果として地殻の応力が限界値を超え岩盤が破壊すること或いは断層が滑ることで地震が生じるという説が注水誘発地震の主な成因とされている。本文では、Lei 他(2008)に基づき中国栄昌天然ガス田における注水誘発地震を例とし注水誘発地震の統計的な特徴を紹介する。

2. 中国栄昌天然ガス田における注水誘発地震

中国四川盆地の西南部に多数の天然ガス田が分布している。そのガス田の一つである栄昌ガス田は四川盆地南部北東方向に数百 km も伸びる低い山脈に南西端部に発達している背斜構造に分布している(第1, 2図)。栄昌ガス田において、1988年から天然ガス生産過程でできた廃水を深度3Kmの井戸にポンプ圧2.9MPa以下で断続的に圧入した。2001年まで、総量100万トンの水が注入された。この地域は相対的に安定していて、歴史上災害地震の記録がないだけでなく、有感地震(この辺ではM3からが有感)も少ないといわれている。しかし、注入操業開始直後から有感微小地震が多発したため臨時観測点が設置され、後固定地震観測点に移行した。注入量の増加に伴い、1993-1994年にM4からM4.2の地震数回、1995年にM4.5、1997年8月13日にM5.2の地震が続々発生し、最大マグニチュードを次々に更新した。2006年まで、M5級は2回、M4級は14回、M3級は100回以上発生し、地表の地震計で計3万2千以上の地震が近傍の地震計に記録された(第3図)。

背斜構造の直下に山脈の走行と平行に総長数百 km の伏在逆断層が存在している。伏在逆断層の上に覆っている堆積層は撓曲構造を示すが、小規模な断層も発達している。主要な注水井戸LUO-4はこのような断層の破碎帯に位置する。最大のM5.2の地震を含め規模の大きい地震の多くは伏在逆断層と関係あるとされている。

栄昌注水誘発地震の時系列について、統計的な手法を用いて詳しく調べた。まず、注入レートと地震の発生が連動していることが確認された。さらに、ETAS(Epidemic-Type Aftershock Sequence)モデリング手法を駆使し、注水により誘発(外部トリガー)した地震と地震自身によりセルフトリガーした地震(大森則に従う“余震”活動)、それぞれの活動の割合を統計的に割り出すことを試みた。

第3図に注水の履歴、地震時系列及び主な統計パラメータを示す。注水履歴と調和的に、地震活動が三つの特徴的なフェーズ(期間)に分けることができる。フェーズI(1988-1992)は初期注入期間(低い注入レートと圧力)に対応し、地震活動は時間がたつにつれて次第に増加する発生率、減少するb値、増加するSCL(空間相関距離)とD2(震源分布のフラクタル次元)を示す。フェー

ズ II (1993-1997) は月間注水量 8000 m^3 を超えた期間で、高い地震発生率、低くて短期間に変動する b 値、および減少する SCL が特徴づける。フェーズ III (1998-) は主要注入井の注入レートが減少する期間に対応し、減少する地震発生率、低 b 値、増加する SCL を示す。

第 4 図にフェーズ II に対し地震の月頻度と主要注入井 Luo-4 における月注水量を示す。地震の日頻度と日注水量も示されている。第 4c 図に地震の月頻度と Luo-4 における月注水量との関係を示し、二者の間に正の相関が認められる。また、日注水量曲線のピークの後数日～数週間遅れて地震発生頻度のピークが来ることも認められる。

地震活動の変化は ETAS モデル手法により検出できた。第 5 図はその結果を示したもので、ETAS により検出した地震活動の変化点は第 3 図に示している特徴的なフェーズと良く一致している。フェーズ I では 8% の地震が外部的に（つまり注水）引き起こされ、残りは大森 - タイプの自己誘発活動である。フェーズ II ではランダム成分が 45% に上り、外部的トリガーが重要であることを意味する。フェーズ III においてはランダム成分が支配的になり、大森 - タイプの自己誘発活動は非常に低いことが分かった。注水誘発地震のメカニズムとして間隙圧の上昇による既存断層のクローン破壊応力 (CFS, Coulomb Failure Stress) の変化 (ΔCFS) が要因である。例えば、 1MPa の間隙圧の増加で、あらゆる方向の断層に約 $+0.5\text{MPa}$ の ΔCFF (断層の摩擦係数が 0.5 とすれば) を付加することになる。これは断層の破壊強度が約 0.5MPa 低下することと等しい。以上の結果によると、注水初期段階ではセルフトリガーがメインであったが、後半では外部トリガーが支配的な要素となった。これは地震活動に伴い応力が解放され、注水による大きな ΔCFF がなければ地震自身で引き起こした ΔCFF だけで地震を誘発できなくなることを意味する。

第 3 図に示すように最大の誘発地震の前に b 値と空間相関距離の同時減少が観測された。同様な現象は室内での岩石破壊実験に伴う微小破壊において普遍的に見ることができる。第 6 図にその典型的な例を示す。最終破壊の前に b 値が減少し、震源分布のフラクタル次元と空間相関距離が減少し破壊核形成に伴い大きくなる傾向が良く見られる。複数の解析手法と地震活動統計パラメータの統合により地殻応力の臨界性指針になりうるものを構築できるかもしれない。

3. まとめと展望

栄昌天然ガス田における注水誘発地震の研究から以下のことを明らかにすることができた。(1) 相対的に安定的な地域でも、地下流体注入による誘発地震を引き起こすことがある。(2) 同じガス田でも、断層近くでの注入が地震を誘発するが、数キロでも断層から離れば地震を誘発しないことが観測された。(3) 地震活動変化や応力状態の臨界性を把握するため複数の統計パラメータの統合利用が有効である。(4) ETAS モデル手法を使って注水により誘発 (外部トリガー) された地震と地震自身によりセルフトリガーされた地震 (大森則に従う “余震” 活動) のそれぞれの割合を統計的に割り出すことが可能である。(5) 地下流体圧入はあらゆる産状の断層に正の ΔCFS (クローン破壊応力変化) を付加するが、地震を誘発するための ΔCFS の閾値は地震の発生による応力解放のため次第に大きくなることが示唆されている。

最近の研究から、内陸地震で流体が関与すること普遍的に見ることができる。例えば、高角な逆断層で地震が発生する場合には、地殻深部から流体の供給があることが示唆される。今後、 CO_2 の地下貯留や EGS (Enhanced Geothermal System) の開発などにおける地下流体注入実験が開始されつつあるので注水による誘発地震データが増えることが考えられ、地震予知に資する知見を蓄積することに期待したい。

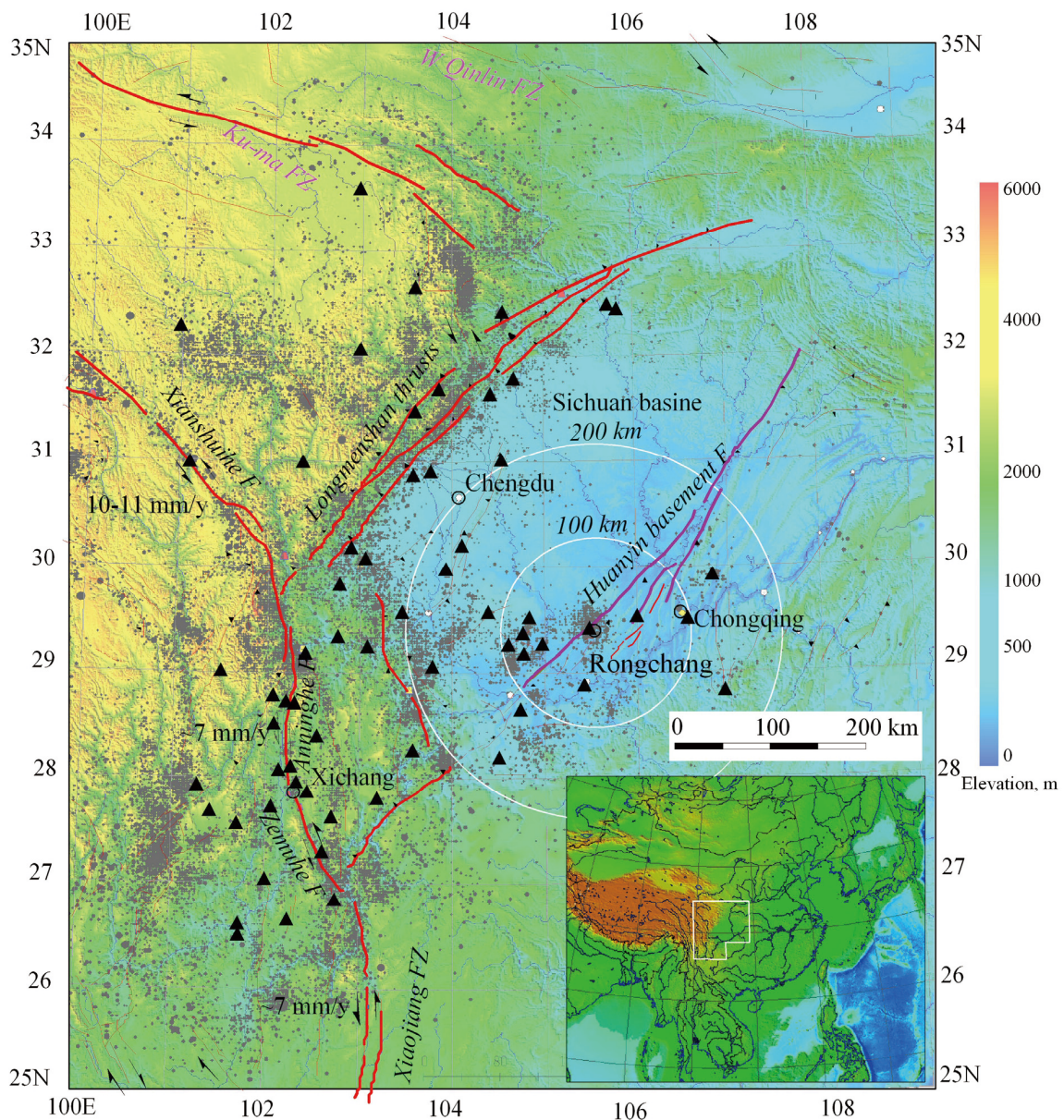
(雷 興林)

参 考 文 献

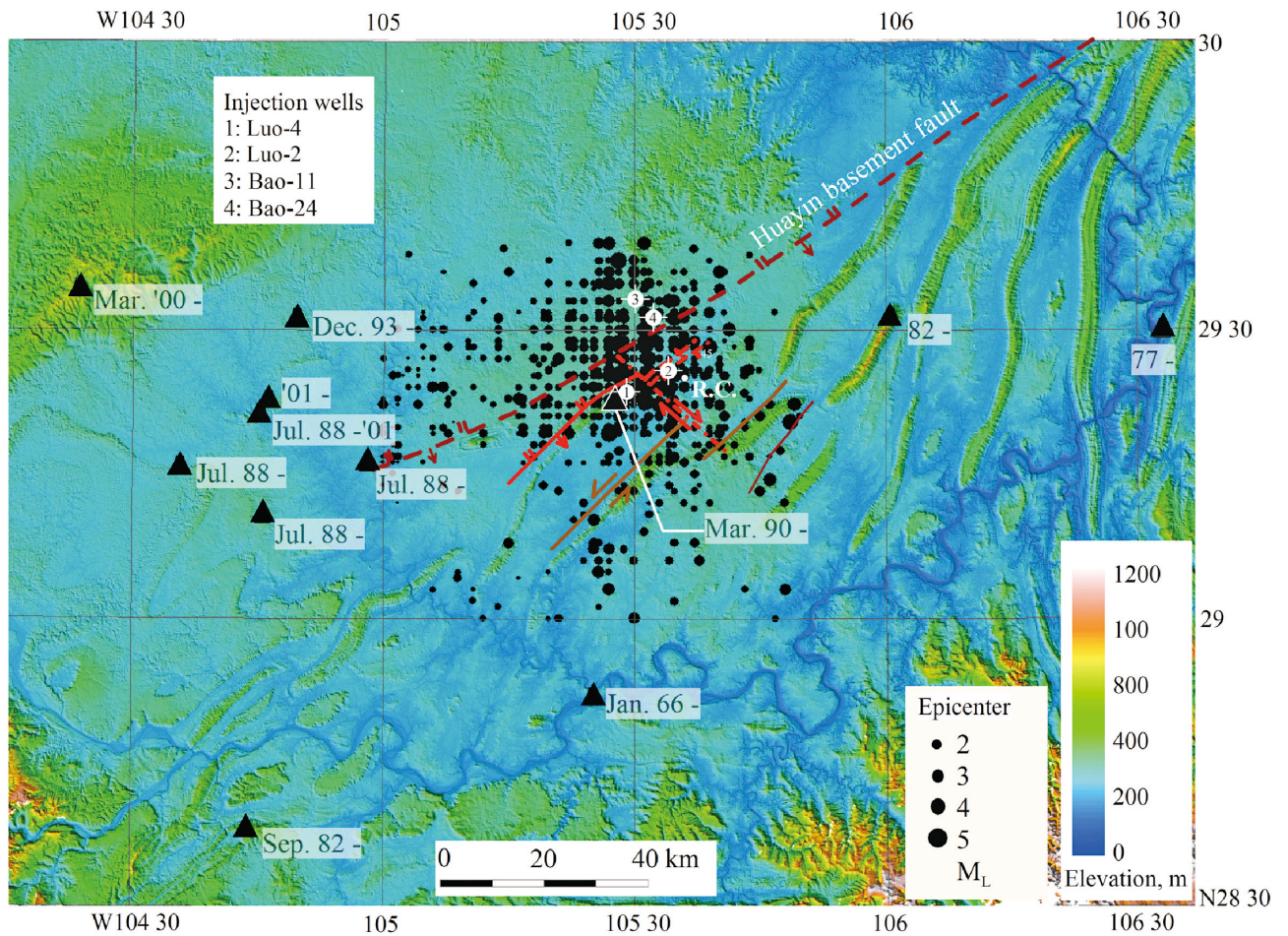
Lei, X., G. Yu, S. Ma, X. Wen, and Q. Wang (2008), Earthquakes induced by water injection at 3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China, *J. Geophys. Res.*, 113, B10310, doi:10.1029/2008JB005604.

Lei, X.-L., Satoh, T., 2007. Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage. *Tectonophysics* 431, 97–111.

Shen, Z.-K., J. Lü, M. Wang, and R. Bürgmann (2005), Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau, *J. Geophys. Res.*, 110, B11409, doi:10.1029/2004JB003421

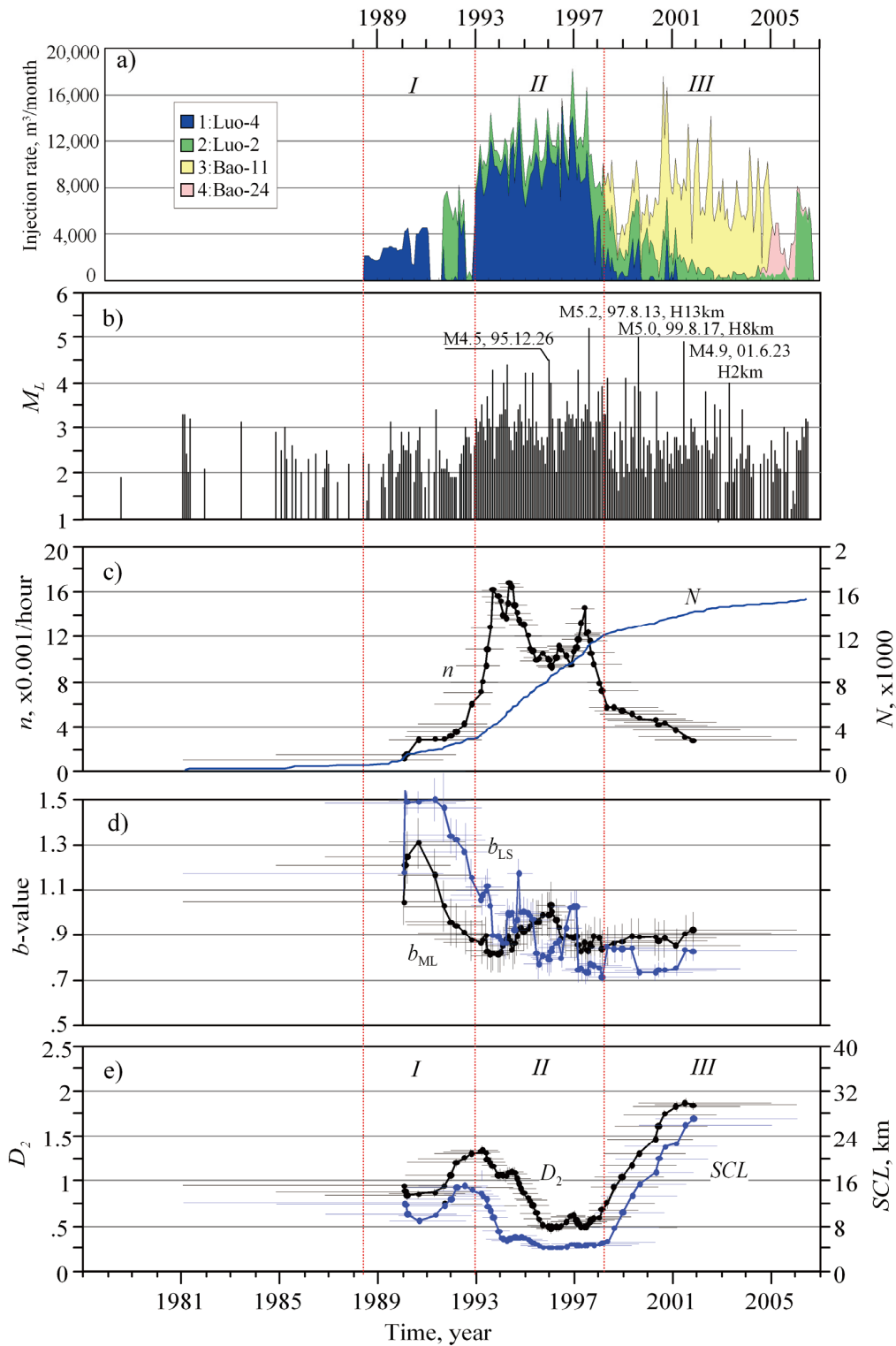


第 1 図 荣昌天然ガス田の位置と構造背景を示す。赤線と紫線はそれぞれ活断層と伏在断層を示す。三角は地震観測点、グレードットは地震震源を示す。活断層のスリップレートは Shen et al. [2005] による。
 Fig. 1 Geographical features of the Sichuan Basin and surrounding areas, including the distribution of earthquakes. Gray dots indicate earthquake epicenters. Triangles indicate the locations of seismic stations. The slip rates of the major faults are taken from Shen et al. [2005].



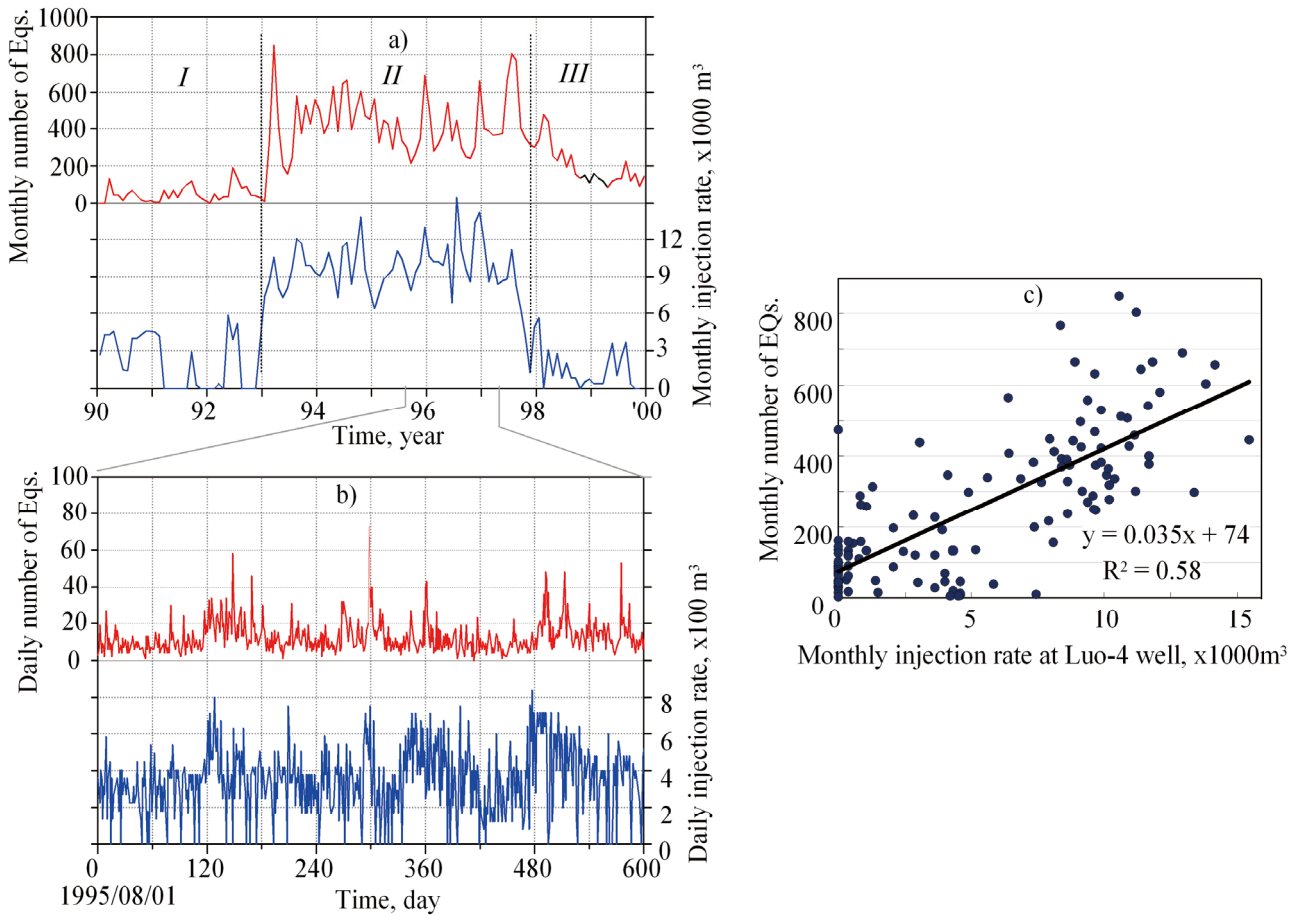
第2図 榮昌天然ガス田排水圧入井の位置，断層，地震観測点および地震の分配を示す．圧入井を中心に120km以内に11の地震観測点（三角形）がある．それぞれの観測点の始動時間も示されている．R.C.は榮昌市の位置を示す．

Fig. 2 Map of the locations of injection wells and the distribution of faults and earthquakes throughout the Rongchang gas field. Eleven seismic stations (triangles) located within 120 km of the main injection well. The operation period of each station is also indicated. R.C. indicates the location of the Rongchang city.



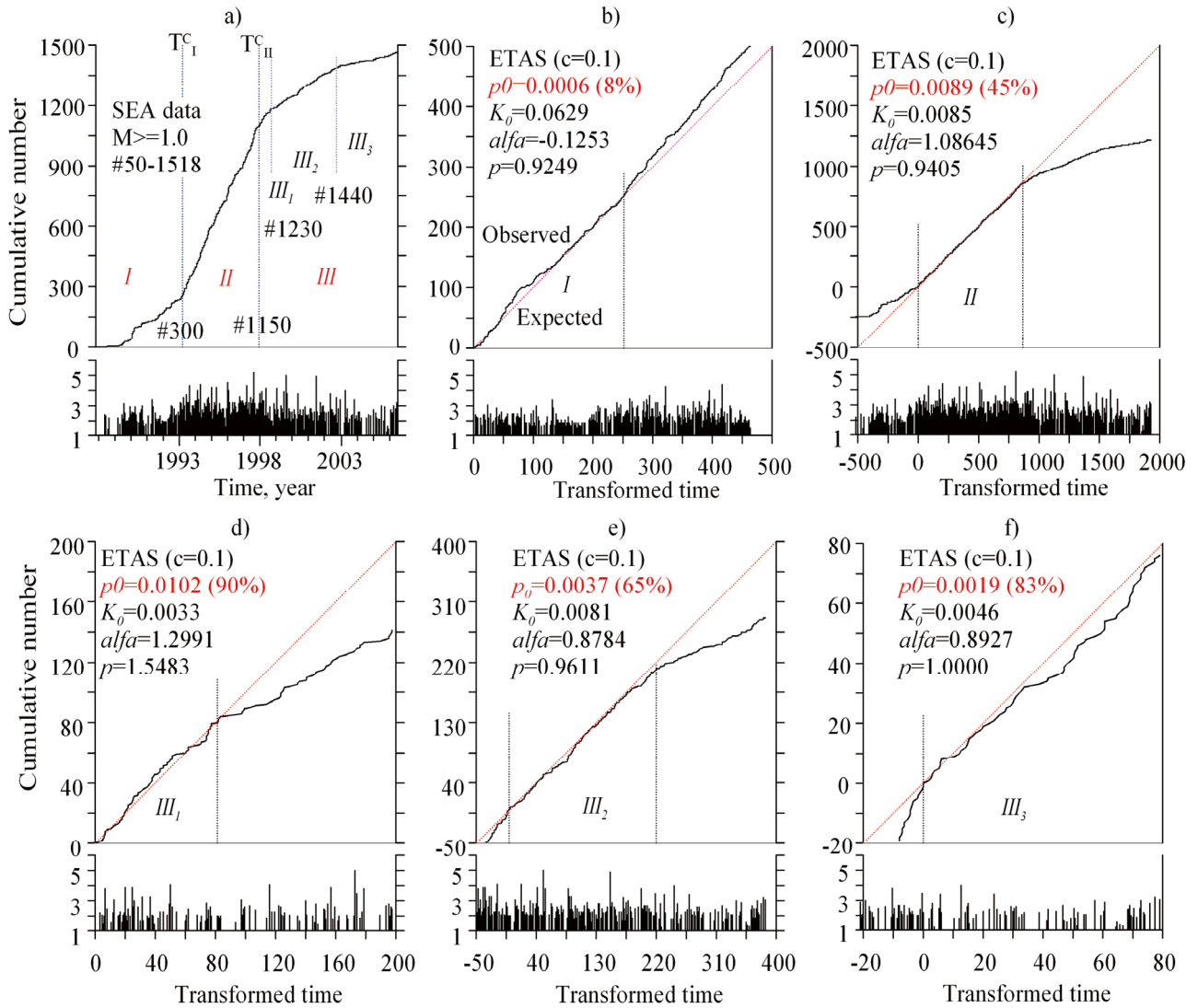
第3図 注水履歴，地震時系列及び主な統計パラメータの時間変化を示す。(a) 月間注水量。(b) 地震マグニチュード。(c) 地震発生頻度と積算値。(d) 地震頻度-規模分布におけるb値。(e) 震源分布の空間相関距離 (SCL) とフラクタル次元 (D_2)。

Fig. 3 Temporal trends in the injection rate and the magnitude and major statistics of earthquakes within the SEA (Sichuan Earthquake Administration) catalog. (a) Monthly volume of injected water. (b) Magnitude of earthquakes. (c) Event rate (n) and cumulative event number (N). (d) The b value in the frequency-magnitude distribution estimated using the least squares method and the maximum likelihood method. (e) Spatial correlation length (SCL) derived from single-link cluster analysis and the fractal dimension (D_2) of the hypocenter distribution. Values in (c)–(e) were calculated sequentially for consecutive groups of 200 events with a running step of 20 events.



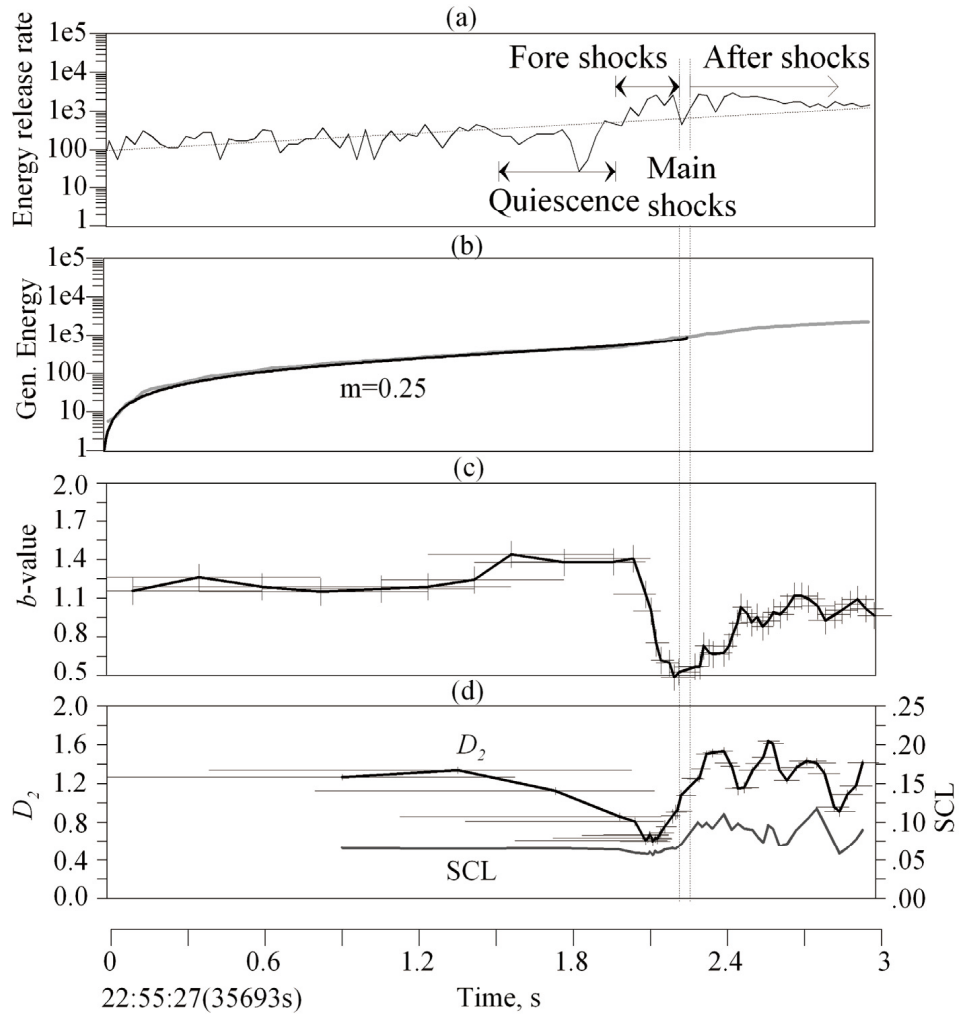
第4図 (a) 地震の月頻度と Luo-4 における月注入力. (b) 地震の日頻度と Luo-4 における日注入力. (c) 地震の月頻度と Luo-4 における月注入力との関係, 二者の間に正的な相関性が示されている. また, 日注入力曲線のピークの後数日~数週間遅れて地震発生頻度のピークが認められる.

Fig. 4 (a) Monthly number of earthquakes and monthly injected volume at the Luo-4 well within the Rongchang gas field. (b) Daily number of earthquakes and daily injected volume at the Luo-4 well. (c) Monthly number of induced earthquakes plotted against monthly injected volume at Luo-4 (only the months were evaluated when water was injected in Luo-4). A positive correlation is identified between the activity rate and injection rate.



第5図 ETAS モデリング結果. 図3に示している特徴的なフェーズと良く一致する地震活動の変化点が抽出され, それぞれのフェーズでの地震活動が異なる特徴が示される. フェーズ I では8%の地震が外部的に (つまり注水) 引き起こされ, 残りは大森-タイプの自己誘発活動である. p_0 はランダム成分で, p_0 が高いほど外部的トリガーの役割対大森-タイプの自己誘発の役割が大きい.

Fig. 5 Summary of the results of epidemic-type aftershock sequence (ETAS) modeling. (a) Two major change points in earthquake activity (T_I C and T_{II} C) and three major phases of activity defined by the change points (I, II, and III) are identified. Two change subpoints are identified in phase III; hence, phase III contains three subphases (III₁, III₂, and III₃). (b-d) Estimated ETAS parameters for each phase and subphase. The cumulative number of earthquakes as a function of time or transformed time (events) is compared with that predicted by the ETAS model.



第 6 図 花崗斑岩試料の破壊に伴う微小破壊の統計パラメータの時間変化. 自然地震と同様, 前震 - 本震 - 余震が観測されている. 震源の近傍に観測できるため, 自然地震でたまに見られる前駆現象: 加速するモーメント解放 (b), b 値減少 (c) 震源空間相関距離の減少と直前の拡散などが普遍に観測される.

Fig. 6 Fracture of a major unbroken asperity on the through-going fault plane in a granitic porphyry sample. The AE activity reveals a typical fore-main-aftershock sequence similar that observed with natural earthquakes. The b-values have been calculated sequentially for consecutive groups of 200 events with an increment of 50 events. The fractal dimension D_2 and SCL of the AE hypocenters have been calculated sequentially for consecutive groups of 50 hypocenters with an increment of 13 hypocenters.